

Studi karakteristik karbon aktif dari cangkang buah ketaping (*Terminalia Catappa*) sebagai elektroda superkapasitor

Study of activated carbon characteristic from ketaping fruit shell (Terminalia Catappa) as supercapacitors electrode

Received 18 August 2020

Accepted 24 September 2020

Published January 2021

Rahma Joni, Syukri dan Hermansyah Aziz*

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Indonesia

Abstrak. Studi karakteristik karbon aktif dari cangkang buah ketaping (*Terminalia Catappa*) sebagai elektroda superkapasitor telah diteliti. Karbon aktif dari cangkang buah ketaping (CBK) disiapkan dengan proses karbonisasi pada suhu 400°C dan Proses aktivasi KOH pada suhu 800°C di bawah aliran gas N₂. Karbon aktif CBK memiliki kandungan karbon dengan massa atomik sebesar 97,52%. Karbon aktif CBK memiliki struktur amorf dengan dua buah puncak yang lebar pada sudut 2θ yaitu 24,93° dan 42,93° yang bersesuaian dengan bidang (002) dan (100). Karbon aktif CBK yang dihasilkan memiliki pola serapan dengan jenis ikatan OH, C-H, C=O, dan C=C. Adanya ikatan OH dan C=O menunjukkan bahwa arang aktif yang dihasilkan cenderung bersifat lebih polar. Morfologi permukaan karbon aktif CBK menunjukkan distribusi ukuran pori yang merata dan luas permukaan yang besar. Luas permukaan spesifik karbon aktif dari CBK adalah 799,892 m²·g⁻¹ dengan volume total pori 0,080 cm³·g⁻¹ dan jari-jari pori rata-rata 1,9072 nm. Kapasitansi spesifik dari karbon aktif dari CBK adalah sebesar 125,446 F·g⁻¹.

Abstract. Studies on the characteristics of activated carbon from ketaping fruit shells (*Terminalia Catappa*) as supercapacitor electrodes have been studied. Activated carbon from ketaping fruit shells (KFS) prepared by carbonization process at 400°C and the KOH activation process is carried out at 800°C under N₂ gas flow. Activated carbon KFS has a carbon content with 97.52% of atomic mass. Activated carbon KFS has an amorphous structure with two wide peaks at an angle of 2θ 24.93° and 42.93° corresponding to the plane (002) and (100). Activated carbon KFS produced has an absorption pattern with OH, C-H, C = O, and C = C bond types. The presence of OH and C = O bonds indicates that the activated charcoal produced tends to be more polar. The surface morphology of activated carbon KFS shows an even distribution of pore size and large surface area. The specific surface area of activated carbon KFS is 799.892 m²·g⁻¹ with a total pore volume 0.080 cm³·g⁻¹ and an average pore radius of 1.9072 nm. The specific capacitance value of activated carbon KFS is 125.444 F·g⁻¹.

Keywords: Ketaping, Activated Carbon, Supercapacitor, Activator, Capacitance.

Pendahuluan

Meningkatnya jumlah penduduk mengakibatkan peningkatan pemakaian energi dalam skala besar. Salah satu jenis energi yang banyak digunakan adalah energi listrik. Sebagai contoh beberapa peralatan rumah tangga memerlukan energi listrik dalam pengoperasiannya. Bahkan teknologi digital seluruhnya menggunakan pasokan energi listrik, seperti, *handphone*, kamera digital, laptop dan lainnya. Kelemahan dari pemakaian energi listrik tersebut adalah peralatan harus berada dekat dengan sumber arus listrik, sehingga muncul permasalahan saat alat-alat tersebut harus dibawa berpergian dalam waktu yang lama. Untuk mengatasi masalah tersebut, telah dikembangkan sistem penyimpan energi listrik seperti baterai litium, sel bahan bakar, dan superkapasitor (Kalyani and Anitha, 2013). Superkapasitor merupakan bagian dari perangkat penyimpanan energi listrik yang semakin penting dan mendapat banyak perhatian karena kemampuannya dalam berbagai aplikasi mulai dari perangkat elektronik hingga kendaraan listrik (Lobato *et al.*, 2017).

Superkapasitor banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan antara lain, kerapatan energi yang tinggi, siklus hidup yang lama, waktu pengisian yang pendek, kemampuan penyimpanan energi yang besar, aman dan bebas dari bahan korosif sehingga aman bagi lingkungan (Enock *et al.*, 2017). Superkapasitor dapat digunakan sebagai penyimpan energi listrik berdasarkan pada prinsip perubahan energi kimia menjadi energi listrik melalui suatu reaksi kimia. Proses penyimpanan energi terjadi karena terbentuknya pasangan ion dalam elektrolit dan elektron pada permukaan antara elektroda dan elektrolit (Wei and Yushin, 2012). Superkapasitor dapat menyediakan *power density* yang lebih besar dikarenakan oleh nilai kapasitansi spesifik yang tinggi berdasarkan luas permukaan yang besar dari material mesopori penyusun elektroda. Semakin luas permukaan elektroda, maka semakin banyak muatan listrik yang dapat tersimpan oleh elektroda superkapasitor (Aziz *et al.*, 2016). Salah satu cara untuk meningkatkan nilai kapasitansi spesifik menggunakan material berpori penyusun elektroda.

Saat ini, telah banyak dikembangkan material berpori untuk elektroda superkapasitor diantaranya adalah bahan berbasis karbon (karbon *nanotube*, karbon *nanofiber*, grafit dan karbon aktif) (Abioye and Ani, 2015), logam transisi NiO, MgO, dan RuO₂ (Lee, Park and Kim, 2017); (Sun *et al.*, 2016); (Li *et al.*, 2018), dan polimer (Zhong *et al.*, 2017). Dibandingkan dengan bahan elektroda yang lain, bahan karbon aktif mudah didapat, biaya murah, memiliki konduktivitas listrik yang tinggi dan luas permukaan yang besar (Poonam *et al.*, 2019). Sebagian besar karbon aktif komersil yang dibuat dari bahan bakar fosil minyak bumi dan batu bara menjadikannya sangat mahal dan tidak ramah lingkungan, sehingga penelitian beralih pada sumber karbon aktif dari biomass limbah organik yang lebih murah, mudah didapat dan ramah lingkungan (Abioye and Ani, 2015). Berbagai penelitian telah banyak dilakukan dalam penggunaan sumber karbon aktif dari biomass limbah organik sebagai elektroda superkapasitor seperti limbah bubuk kopi (Tashima *et al.*, 2014), daun ketaping (Taer *et al.*, 2018), cangkang kelapa sawit (Misnon *et al.*, 2015), enceng gondok (Zheng *et al.*, 2017), tandan kosong kelapa sawit (Farma *et al.*, 2013), dan cangkang biji karet (Pagketanang *et al.*, 2015). Pada penelitian ini dipilih CBK yang banyak ditemukan di daerah Sumatra barat khususnya daerah ketaping sebagai sumber karbon aktif karena mudah didapat, melimpah, terbarukan dan berkontribusi terhadap pengurangan limbah organik. CBK merupakan bagian yang paling keras yang mengandung 37% selulosa, 21,6% hemiselulosa, dan 40,3% lignin (Largitte *et al.*, 2016 dan Ouensanga, Largitte and Arsene, 2003). Perbedaan jenis biomassa menghasilkan jumlah karbon aktif yang berbeda pula. Semakin banyak kandungan selulosa, hemiselulosa dan lignin maka akan semakin banyak karbonaktif yang dihasilkan (González-García, 2018). CBK merupakan tumbuhan asli yang tersebar di daerah tropis seperti Asia Tenggara termasuk Indonesia (Taer *et al.*, 2018). CBK mempunyai cangkang berserat yang struktur porinya mudah dikontrol sehingga menghasilkan struktur pori yang tersusun relatif teratur. Struktur pori teratur akan menghasilkan transfer pemindahan ion yang cepat sehingga menghasilkan daya superkapasitor yang lebih tinggi (Yanti, Taer and Sugianto, 2014). Struktur pori karbon alami memiliki pori makro dengan luas permukaan elektroda relatif rendah. Untuk itu perlunya dilakukan modifikasi struktur pori dalam meningkatkan luas permukaan elektroda karbon aktif. Karbon berpori dengan luas permukaan yang besar didapatkan dengan aktivasi (Abioye and Ani, 2015).

Pada penelitian ini CBK diperlakukan dalam dua proses yaitu proses karbonisasi pada suhu 400°C dan proses aktivasi dengan KOH pada suhu 800°C di bawah aliran gas N₂. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik struktur kristalit, vibrasi molekul, komposisi, morfologi dan struktur pori dari karbon aktif

CBK sebagai elektroda superkapasitor dengan mempelajari sifat elektrokimia yang dihasilkan.

Metodologi

Limbah CBK dikumpulkan di lingkungan Universitas Andalas, Sumatera Barat. CBK yang telah dipotong kecil- kecil dicuci dan dikeringanginkan. CBK yang telah dibersihkan kemudian dikeringkan dengan oven pada suhu 110°C hingga beratnya konstan. CBK kering di karbonisasi pada suhu 400°C selama 4 jam. Karbon yang terbentuk digerus dan diayak dengan ayakan 400 mesh. Karbon dengan ukuran 38 µm diaktivasi dengan KOH. Karbon direndam dengan KOH selama 12 jam pada rasio molar 1:5. Setelah proses perendaman karbon yang sudah disaring dan dikeringkan dengan oven, kemudian di aktivasi pada suhu awal 400°C ditahan selama satu jam, kemudian dinaikkan menjadi 600°C ditahan selama satu jam dan terakhir dinaikan selama 800°C ditahan selama 1,5 jam. Proses aktivasi dilakukan di bawah aliran gas N₂ dengan laju alir sebesar 5 °C/menit. Karbon yang sudah diaktivasi dicuci dengan HCL hingga pH 7 untuk menghilangkan pengotoran organik.

Karbon aktif CBK dikarakterisasi menggunakan alat *X-Ray Diffraction* (XRD *PIXcelID*) dengan sumber CuKα pada panjang gelombang 0,154 nm untuk menentukan struktur kristalit karbon. Vibrasi molekul karbon aktif dikarakterisasi dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR *Shimadzu8400*). Morfologi permukaan dan komposisi karbon aktif dikarakterisasi dengan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) menggunakan alat *HITACHIS-3400N*. Struktur pori dari karbon aktif CBK dipelajari dengan alat *QuantachromeAsiQwin v3.01* pada temperatur 77 K. Luas permukaan ditentukan dengan metode *Brunauer-Emmet-Teller* (BET) dan volume pori ditentukan dengan metode *Barrett-Joyner-Halenda* (BJH).

Superkapasitor dirakit dengan dua buah plat karbonaktif CBK yang sudah berbentuk pelat dan dipisahkan oleh saporator membran telur. Pengukuran sifat elektrokimia dilakukan dengan menggunakan *Cyclic Voltametry* CV dengan potensial 0-1 V dan kecepatan pemindaian 1, 2, 5, 10 mVs⁻¹ dalam larutan elektrolit H₂SO₄ 1M. Nilai arus, potensial dan waktu yang didapatkan pada sel superkapasitor digunakan untuk menghitung nilai kapasitansi spesifik dengan menggunakan Pers. (1).

$$C_{sp} = \frac{I_c \cdot I_d}{S \cdot m} \quad (1)$$

dimana C_{sp} adalah kapasitansi spesifik, I_c adalah arus *charge*, I_d adalah arus *discharge*, S adalah *scan rate* dan m adalah massa elektroda (Taer *et al.*, 2018).

Hasil Penelitian

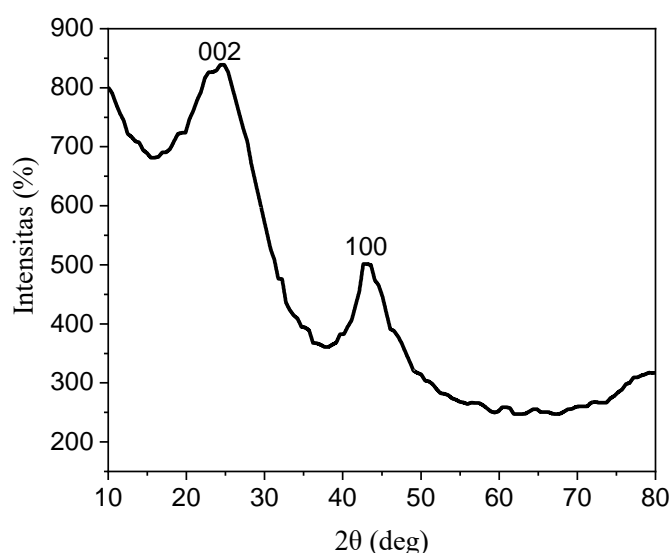
Hasil penelitian ini berupa analisis data dari karakterisasi sifat fisis karbon aktif CBK yang memuat tentang

komposisi, struktur kristalit, vibrasi molekuler, morfologi permukaan dan struktur pori (Kurva N_2 adsorpsi desorpsi dan kurva distribusi ukuran pori). Tabel 1 menunjukkan kandungan karbon aktif CBK dan karbon aktif gelagah (Rawal, 2018) sebagai pembandingan.

Tabel 1 Kandungan Karbon Aktif CBK dan Gelagah

Elemen	Persen Berat (% wt)	
	CBK	Gelagah (Rawal, 2018)
C	97,52	95,07
O	2,48	3,65
Cl	0	0,14

Hasil analisis EDX menunjukkan bahwa komposisi kimia yang paling dominan pada karbon aktif CBK dan gelagah adalah elemen karbon (C). Analisis ini dapat dilihat bahwa elemen karbon aktif CBK mengandung karbon lebih besar dari gelagah seperti yang terlihat pada Tabel 1. Sebanyak 2,48 % unsur oksigen juga ditemukan dalam sampel karbon aktif CBK. Setelah proses aktivasi kimia, komposisi yang tersisa hanya unsur karbon dan sedikit unsur oksigen (Rawal, 2018). Unsur oksigen yang terdapat pada karbon aktif ini adalah unsur oksigen yang berasal dari bahan baku yang tertinggal akibat proses karbonisasi yang tidak sempurna (Zheng, 2017). Unsur klorida dengan persentase sedikit yang terdapat pada karbon aktif gelagah berasal dari unsur penyusun aktivator. Aktivator yang digunakan oleh Rawal (2018) adalah $ZnCl_2$. Selain itu Cl yang terbentuk juga disebabkan karena proses pencucian yang tidak sempurna.

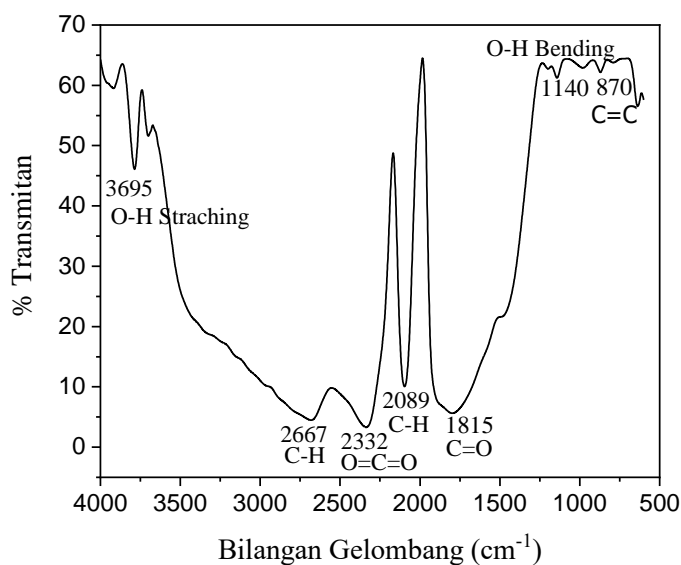


Gambar.1 Pola Difraksi Sinar X karbon aktif dari cangkang buah ketaping setelah aktivasi dengan KOH

Struktur kristalit suatu material dapat ditentukan melalui pengukuran XRD. Struktur kristalit karbon aktif dari cangkang buah ketaping ditunjukkan dengan pola difraksi pada Gambar 1. Gambar tersebut memperlihatkan hubungan antara intensitas (a.u)

terhadap sudut hamburan (2θ). Karbon aktif CBK dari analisis XRD menunjukkan struktur amorf dengan 2 puncak yang lebar pada sudut 2θ yaitu 26.189° dan 43.917° yang bersesuaian dengan bidang (002) dan (100). Kehadiran puncak yang lebar ini, sejalan dengan *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS No.75-1621) dimana Sebuah refleksi yang terletak pada $2\theta \approx 26^\circ$ yang mengindikasikan struktur grafit pada bidang 002 yang membuat struktur *graphen* ini mirip dengan karbon aktif. Hal yang sama juga dilaporkan oleh Zheng *et al.* (2017) dan Aziz *et al.* (2016). Berdasarkan hasil ini maka karbon aktif CBK dapat digunakan sebagai bahan elektroda pada superkapasitor.

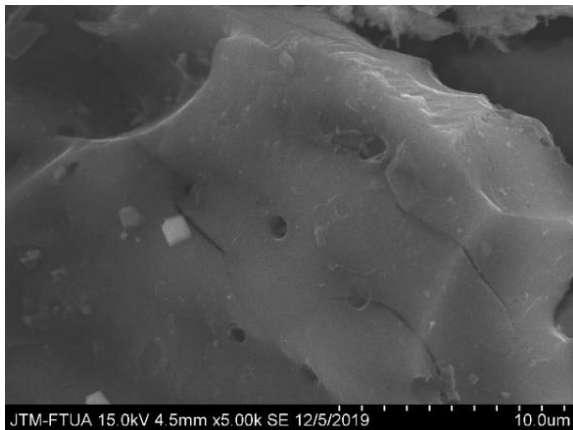
Gambar.2 memperlihatkan pita serapan yang dihasilkan dari aktivasi dengan KOH terhadap cangkang kelapa sawit. Puncak yang luas dan kuat pada bilangan gelombang 3695 cm^{-1} yang merupakan gugus fungsi O-H *stretching*, hal ini juga diperkuat dengan munculnya pita serapan pada bilangan gelombang 1140 cm^{-1} yang mengindikasikan gugus fungsi OH *bending* yang berasal dari molekul air dan gugus hidroksil yang terbentuk pada permukaan karbon aktif (Misnon *et al.*, 2015). Karbon aktif CBK juga menyerap pada bilangan gelombang 2667 cm^{-1} yang merupakan gugus fungsi C-H *stretching*/regangan, yang diperkuat dengan adanya pita serapan pada 2089 cm^{-1} yang merupakan C-H *bending*. Proses pembakaran tidak sempurna aktivasi KOH juga menyisakan gugus CO_2 pada bilangan gelombang 2332 cm^{-1} (Hui and Zaini, 2015).



Gambar 2 Spektrum FTIR karbon aktif CBK

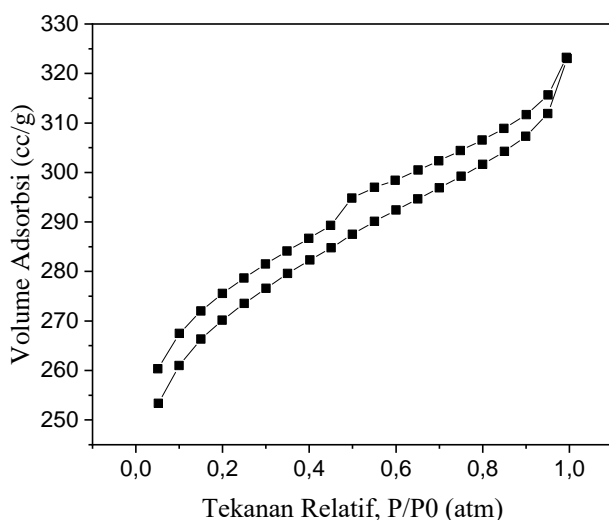
Proses karbonisasi dan aktivasi juga telah membentuk ikatan C=C aromatik disekitar 870 cm^{-1} . Hal ini membuktikan bahwa karbonisasi dan aktivasi menjadi arang aktif akan meningkatkan senyawa aromatik penyusun struktur heksagonal arang dan arang aktif (Mopoung *et al.*, 2015). Karbon aktif dari cangkang buah ketaping yang dihasilkan memiliki pola serapan dengan jenis ikatan OH, C-H, C=O, dan C=C. Adanya ikatan OH dan C=O menunjukkan bahwa arang aktif yang

dihasilkan cenderung bersifat lebih polar. Dengan demikian arang aktif yang dihasilkan dapat digunakan sebagai material elektroda superkapasitor.



Gambar 3 Mikrograf SEM karbon aktif CBK dengan perbesaran 5000 X

Analisis SEM terhadap karbon aktif CBK melalui perlakuan aktivasi dengan KOH mengakibatkan terbentuknya struktur pori pada permukaan karbon aktif dengan diameter pori berkisar antara 0,24 – 0,36 μm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Hal ini sama yang dilaporkan oleh Misnon (2015) dengan menggunakan sampel karbon aktif dari cangkang kelapa sawit yang menyatakan bahwa karbon aktif dengan perlakuan aktivasi dapat meningkatkan porisitas dari bahan karbon aktif (Misnon *et al.*, 2015). Struktur pori yang bagus dapat memudahkan ion-ion elektroli untuk berdifusi pada permukaan karbon (Rawal, Joshi and Kumar, 2018). Karbon aktif CBK dengan perlakuan aktivasi dengan KOH menyebabkan ukuran volume pori menjadi lebih besar dan distribusi ukuran pori lebih merata.

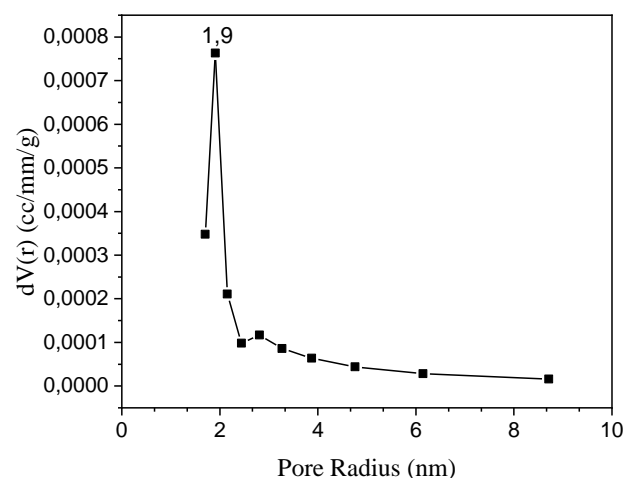


Gambar 4 Kurva isotrem adsorpsi-desorpsi N_2 dari karbon aktif CBK

Analisis kurva isotherm adsorpsi/desorpsi nitrogen untuk karbon aktif CBK dianalisis menggunakan

pengukuran *Surface Area Analyser* (SAA). Isoterm adsorpsi-desorpsi menggunakan nitrogen pada 77 K untuk sampel cangkang buah ketaping ditunjukkan pada Gambar 4. Isoterm adsorpsi N_2 pada 77 K mengandung sejumlah besar informasi yang berkaitan dengan struktur pori dan luas permukaan spesifik. Perubahan bentuk kurva isotherm mengisyaratkan perubahan struktur pori dan luas permukaan spesifik (Lee *et al.*, 2019). Gambar 4 menunjukkan kurva N_2 adsorpsi-desorpsi karbon aktif CBK pada 77 K. Kurva N_2 adsorpsi-desorpsi menunjukkan hubungan antara volume adsorpsi (@STP, cc/g) terhadap tekanan relatif (P/P_0). Menurut klasifikasi *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) Ada enam jenis pola isotherm adsorpsi (De Lange *et al.*, 2014). Menurut standar IUPAC, kurva isotherm N_2 dari karbon aktif CBK pada Gambar.4 semuanya memiliki bentuk tipe I yang sebagian besar terdiri dari mikropori. Kurva menampilkan pertumbuhan curam pada tekanan relatif rendah ($P/P_0 < 0,2$), menunjukkan adanya mikro pori pada sampel karbon aktif cangkang buah ketaping. Menurut Yadav (2020), salah satu ciri khas isotherm tipe I adalah bahan mikro pori dengan luas permukaan yang besar dan memiliki pori-pori yang sempit (Yadav *et al.*, 2020). Pertumbuhan kurva yang curam pada isotherm tipe I dengan $P/P_0 < 0,2$ juga dilaporkan oleh Zheng (2017) yang memiliki kemiripan kurva isotherm.

Aktivasi dengan menggunakan KOH pada material karbon dipelajari untuk meningkatkan luas permukaan dan memperbaiki *performance* elektrokimianya (Chao *et al.*, 2013). Luas permukaan spesifik dan total volume pori karbon aktif ditentukan dengan S metode BET sedangkan distribusi ukuran pori dan rata-rata jari-jari pori ditentukan dengan metode BJH. Karbon aktif CBK memiliki luas permukaan (S_{BET}) sebesar 799.892 m^2/g dengan total volume pori 0.080 cm^3/g . Gambar.5 menunjukkan distribusi ukuran pori yang dihitung dengan data desorpsi menggunakan metode Barret-Joyner-Halenda (BJH) (Marsh *et al.*, 2006).

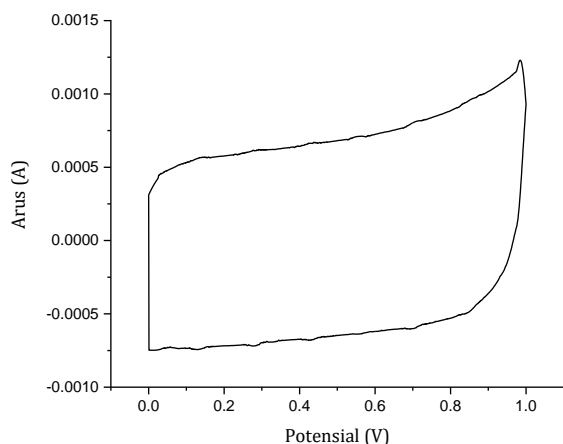


Gambar 5 Distribusi ukuran pori dari karbon aktif CBK

Struktur pori karbon aktif memiliki distribusi ukuran pori yang terdiri dari mikro pori ($< 2,0 \text{ nm}$), meso pori (2 - 50

nm) dan makro pori (> 50 nm) (Iroet *et al.*, 2016). Karbon aktif cangkang buah ketaping memiliki struktur mikro pori dan meso pori seperti yang terlihat pada Gambar 5. Grafik distribusi pori menunjukkan hubungan antara jari-jari pori dengan volume pori sampel karbon aktif. $dV(r)$ (cc/nm/g) maksudnya adalah banyak pori dengan ukuran nm yang terdistribusi pada karbon aktif dalam cm^3 per gram sampel. Dari grafik terlihat bahwa distribusi pori berkisar antara 1,7 nm hingga 8,9 nm. Karbon aktif CBK memiliki jari-jari pori sebesar 1,90724 nm. Dari grafik distribusi tersebut menyatakan bahwa puncak tertinggi terletak pada ukuran mikro pori sedangkan ukuran mesopori memiliki volume pori yang sedikit. Hal yang sama juga dilaporkan oleh Ma (2019).

Kapasitansi spesifik elektroda superkapasitor berbahan dasar karbon aktif dari cangkang buah ketaping diukur menggunakan metode *Cyclic Voltametri*. Gambar 6 menunjukkan kurva voltammogram dalam menentukan nilai kapasitansi spesifik dari elektroda super kapasitor berbahan dasar karbon aktif CBK.



Gambar 6 Kurva Voltammogram Siklik sel Superkapasitor

Gambar.6 menunjukkan hubungan antara arus (A) dan tegangan (V). Arus muatan (I_c) ditunjukkan pada kurva dari tegangan 0 hingga 0,5 V, sedangkan arus luaran (I_d) ditunjukkan pada tegangan 0,5V hingga 0. Bentuk kurva elektroda superkapasitor berbahan karbon aktif CBK menunjukkan bentuk *rectangular* yang bagus dengan bentuk yang simetris dan mempunyai jarak yang lebar sehingga menghasilkan nilai kapasitansi spesifik yang paling tinggi yaitu sebesar 125,446 F/g. Pengukuran nilai kapasitansi spesifik dengan metode siklisvoltametri diperoleh dengan menggunakan Pers.(1). Besar arus yang dihasilkan pada voltammogram siklik dapat ditentukan dengan cara menentukan nilai tengah dari besarnya tegangan yang diperoleh (Taer *et al.*, 2018). Elektroda yang mempunyai luas permukaan tinggi akan mempengaruhi nilai kapasitansi spesifik dari sel superkapasitor. Elektroda karbon aktif dengan luas permukaan yang tinggi akan meningkatkan nilai kapasitansi spesifik dari sel superkapasitornya (Rawal, Joshi and Kumar, 2018).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa karbon dari cangkang buah ketaping dapat digunakan sebagai bahan elektroda superkapasitor. Karbon aktif dari cangkang buah ketaping yang diaktivasi dengan KOH memiliki *performance* yang baik sebagai bahan elektroda superkapasitor. Analisis komposisi karbon menunjukkan elemen karbon (C) adalah elemen yang paling dominan yang terkandung dalam sampel elektroda. Karbon aktif CBK memiliki struktur amorf dengan dua buah puncak yang lebar. Karbon aktif dari cangkang buah ketaping yang dihasilkan menunjukkan bahwa karbon aktif cenderung bersifat lebih polar. Karbon aktif dengan ukuran partikel $38 \mu\text{m}$ yang diaktivasi dengan KOH memiliki morfologi dengan distribusi pori yang merata dan memiliki diameter pori berkisar antara $0,24 - 0,36 \mu\text{m}$. Luas permukaan spesifik karbon aktif CBK didapatkan sebesar $799,892 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan nilai kapasitansi spesifik sebesar 125,446 F/g.

Referensi

- Abioye, A. M. and Ani, F. N. (2015) 'Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 52, pp. 1282–1293. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.129.
- Aziz, H. et al. (2016) 'Electrical properties of supercapacitor electrode-based on activated carbon from waste palm kernel shells', *Der Pharma Chemica*, 8(15), pp. 227–232.
- Enock, T. K. et al. (2017) 'Status of Biomass Derived Carbon Materials for Supercapacitor Application', *International Journal of Electrochemistry*, 2017, pp. 1–14. doi: 10.1155/2017/6453420.
- Farma, R. et al. (2013) 'Preparation of highly porous binderless activated carbon electrodes from fibres of oil palm empty fruit bunches for application in supercapacitors', *Bioresource Technology*, 132, pp. 254–261. doi: 10.1016/j.biortech.2013.01.044.
- González-García, P. (2018) 'Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 82(xxxx), pp. 1393–1414. doi: 10.1016/j.rser.2017.04.117.
- Hui, T. S. and Zaini, M. A. A. (2015) 'Potassium hydroxide activation of activated carbon: A commentary', *Carbon Letters*, 16(4), pp. 275–280. doi: 10.5714/CL.2015.16.4.275.
- Kalyani, P. and Anitha, A. (2013) 'Biomass carbon & its prospects in electrochemical energy systems', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 38(10), pp. 4034–4045. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.048.
- De Lange, M. F. et al. (2014) 'Adsorptive characterization of porous solids: Error analysis

- guides the way', *Microporous and Mesoporous Materials*. Elsevier Inc., 200, pp. 199–215. doi: 10.1016/j.micromeso.2014.08.048.
- Largitte, L. et al. (2016) 'Comparison of the adsorption of lead by activated carbons from three lignocellulosic precursors', *Microporous and Mesoporous Materials*. Elsevier Ltd, 219, pp. 265–275. doi: 10.1016/j.micromeso.2015.07.005.
- Lee, H. M. et al. (2019) 'Mesopore-rich activated carbons for electrical double-layer capacitors by optimal activation condition', *Nanomaterials*, 9(4). doi: 10.3390/nano9040608.
- Lee, K. S., Park, M. S. and Kim, J. D. (2017) 'Nitrogen doped activated carbon with nickel oxide for high specific capacitance as supercapacitor electrodes', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Elsevier B.V., 533, pp. 323–329. doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.09.008.
- Li, Q. et al. (2018) 'Ruthenium based materials as electrode materials for supercapacitors', *Chemical Engineering Journal*, 333(September), pp. 505–518. doi: 10.1016/j.cej.2017.09.170.
- Lobato, B. et al. (2017) 'Capacitance and surface of carbons in supercapacitors', *Carbon*, 122, pp. 434–445. doi: 10.1016/j.carbon.2017.06.083.
- Misnon, I. I. et al. (2015) 'Electrochemical properties of carbon from oil palm kernel shell for high performance supercapacitors', *Electrochimica Acta*. Elsevier Ltd, 174(1), pp. 78–86. doi: 10.1016/j.electacta.2015.05.163.
- Mopoung, S. et al. (2015) 'Characterization and Properties of Activated Carbon Prepared from Tamarind Seeds by KOH Activation for Fe(III) Adsorption from Aqueous Solution', *Scientific World Journal*, 2015. doi: 10.1155/2015/415961.
- Ouensanga, A., Largitte, L. and Arsene, M. A. (2003) 'The dependence of char yield on the amounts of components in precursors for pyrolysed tropical fruit stones and seeds', *Microporous and Mesoporous Materials*, 59(2–3), pp. 85–91. doi: 10.1016/S1387-1811(03)00288-9.
- Pagketanang, T. et al. (2015) *Microporous Activated Carbon from KOH-Activation of Rubber Seed-Shells for Application in Capacitor Electrode*, *Energy Procedia*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.550.
- Poonam et al. (2019) 'Review of supercapacitors: Materials and devices', *Journal of Energy Storage*, 21(October 2018), pp. 801–825. doi: 10.1016/j.est.2019.01.010.
- Rawal, S., Joshi, B. and Kumar, Y. (2018) 'Synthesis and characterization of activated carbon from the biomass of *Saccharum bengalense* for electrochemical supercapacitors', *Journal of Energy Storage*. Elsevier, 20(October), pp. 418–426. doi: 10.1016/j.est.2018.10.009.
- Sun, F. et al. (2016) 'Porous carbon with a large surface area and an ultrahigh carbon purity via templating carbonization coupling with KOH activation as excellent supercapacitor electrode materials', *Applied Surface Science*. Elsevier B.V., 387, pp. 857–863. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.06.176.
- Taer, E. et al. (2018) 'The physical and electrochemical properties of activated carbon electrode made from *Terminalia Catappa* leaf (TCL) for supercapacitor cell application', *Journal of Physics: Conference Series*, 1120(1). doi: 10.1088/1742-6596/1120/1/012007.
- Tashima, D. et al. (2014) 'Microporous activated carbons from used coffee grounds for application to electric double-layer capacitors', *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 9(4), pp. 343–350. doi: 10.1002/tee.21978.
- Wei, L. and Yushin, G. (2012) 'Nanostructured activated carbons from natural precursors for electrical double layer capacitors', *Nano Energy*. Elsevier, 1(4), pp. 552–565. doi: 10.1016/j.nanoen.2012.05.002.
- Yanti, S., Taer, E. and Sugianto (2014) 'Efek Modifikasi Permukaan Karbon Aktif Monolit Terhadap Sifat Fisis Dan Elektrokimia Sel Superkapasitor', 1(2), pp. 161–168.
- Zheng, K. et al. (2017) 'The porous carbon derived from water hyacinth with well-designed hierarchical structure for supercapacitors', *Journal of Power Sources*, 366, pp. 270–277. doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.034.
- Zhong, X. et al. (2017) 'Cross-linking of polymer and ionic liquid as high-performance gel electrolyte for flexible solid-state supercapacitors', *Electrochimica Acta*. Elsevier Ltd, 244, pp. 112–118. doi: 10.1016/j.electacta.2017.05.110.